

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 380 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 38 * 2012-12

DOI: 10.5846/stxb201205040639

秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7375-7382.

Qin L J, Jin Y H, Duan P L. Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7375-7382.

不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响

秦丽杰*, 靳英华, 段佩利

(东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

摘要: 玉米是吉林省西部的主要农作物, 水是玉米生产的主要制约因素。如何有效利用有限的水资源, 保证玉米高产是亟需解决的问题。通过大田试验, 探讨不同播种时间对吉林省西部玉米生产过程中绿水消耗量及其来源的影响, 以提高雨水的利用率。3a 大田试验的研究结果表明, 无论是降水较充足的 2005 年, 还是一般干旱的 2006 年和极端干旱的 2007 年, 玉米生产需水量中均以绿水消耗量为主, 占 98% 以上。玉米生产的绿水足迹中, 2005 年以有效降水足迹为主, 2006 年、2007 年以土壤水足迹为主。前 3 个播期的玉米绿水足迹中有效降水量所占比例, 2005 年分别为 80.4%、87.6% 和 89.1%, 2006 年分别为 41.3%、43.3% 和 46.6%, 2007 年分别为 34.2%、35.5% 和 36.5%。适当晚播使玉米生长季中有相对较多的降水量, 气温亦较高, 雨热匹配较好, 利于玉米生长, 而且绿水足迹中有效降水量所占比重也较大。因此, 适当晚播有利于提高雨养农业区雨水的利用率, 保护土壤水平衡, 促进农业的可持续发展。

关键词: 绿水足迹; 不同播种时间; 玉米; 吉林省西部

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province

QIN Lijie*, JIN Yinghua, DUAN Peili

College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: Maize is the main crop in western Jilin Province. Water is a major constraint on maize production. How to effectively utilize the limited water resources to ensure maize production needs to be solved urgently. Formerly the irrigation water was as the key indicator to measure the water consumption during crop production. However, it neglected the consumption of soil water and water pollution. Water footprint connects the physical and virtual forms of water, which covers blue water, green water and gray water. It can truly reflect water demand and its sources. Recently, the most studies regarding water footprint are to investigate the water footprints of consumer products and products trade between regions or countries. Whereas researching the water footprint in the production process is little.

According to the field experiments of maize, we explore the impact of different sowing dates on the source and consumption of green water, to determine the satisfactory degree of precipitation on maize growth and achieve the optimum matching relationship between sowing date and precipitation and temperature in maize growing season under the background of global warming. Results of 3-years experiments showed that either in the rainy year of 2005, or in the drought year of 2006 and extreme drought year of 2007, the green water consumption was the main water requirement in the maize production, which took the ratio over 98%. The green water footprint of maize production was mainly the effective precipitation in 2005 and soil water in 2006 and 2007. Effective precipitation in the green water footprint of the first three

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB121101); 吉林省科技发展计划项目(20070559); 教育部人文社会科学规划基金项目(10YJA840032); 吉林省教育厅社会科学项目(2007552)

收稿日期: 2012-05-04; **修订日期:** 2012-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinlj953@nenu.edu.cn

sowing dates accounted for 80.4%, 87.6% and 89.1% during 2005, 41.3%, 43.3% and 46.6% during 2006, and 34.2%, 35.5% and 36.5% during 2007, respectively. It implied that late sowing could gain more precipitation and higher temperature in maize growing stages. Water and thermal resources matched well, which was beneficial to maize production. Moreover, the effective precipitation took large ratio in the green water footprint. Therefore, late sowing is useful to enhance the rate of rainwater utilization, keep the soil water balance and promote the agricultural sustainable development.

In the current studies of virtual water and water footprint, the basically method was statistics calculation and analysis. However the statistics do not reflect the differences within the region, the practical production and the water consumption. Field experiments, from the microscopic view, can break through the limitations that the studies of virtual water, water footprint are only from the view of macro- and meso-scale. This paper investigates the regularity of the green water footprint of maize in different sowing dates under the same conditions of soil and cropland management, and provides the basis for the further subdivision of green water and the improvement of green water utilization.

Key Words: green water footprint; different sowing dates; maize; western Jilin province

玉米是吉林省西部的主要农作物,但吉林省西部干旱缺水,生态环境脆弱,水是玉米生产的主要制约因素。如何有效利用有限的水资源,保证玉米高产是亟需解决的问题。以往通常以灌溉用水作为衡量作物生产耗水的主要指标,忽视了作物生长中对土壤水的利用及生产过程中可能造成的水质污染。

虚拟水概念^[1]的提出打破了人们固有的“实体水”观念,将包含在产品中“看不见”的水加以利用。水足迹^[2]则将实物形态的水与虚拟形态的水联系起来,涵盖了蓝水、绿水和灰水,可以真实地反映对水资源的需求及所需水资源的来源。

在目前的水足迹研究中,探讨居民消费产品的水足迹及国家、地区间产品贸易的水足迹较多^[3-13],而探讨这些产品生产过程中消耗的水量及其来源的则较少。本文通过大田试验,探讨在全球气候变化的背景下,吉林省西部玉米播种日期的延后对生产过程中绿水消耗量及其来源的影响,即比较分析不同播种时间玉米绿水足迹的动态变化,以实现水资源的合理利用,保护生态环境,促进农业的可持续发展。

1 研究区概况

研究区位于吉林省西部长岭县的东北师范大学松嫩草地生态研究站(44°40' N, 123°44' E)附近的农田,土壤为风沙土。研究区年平均温度 5.2℃,活动积温 2920℃,无霜期 140—160d,年平均降水量 453 mm,约 70%的降水量集中在 6—8 月份。年平均蒸发量 1600 mm,约是降水量的 3.5 倍。春季的干旱(3—5 月)和大风(17.2—20.7 m/s)是该地区气候的典型特征。农业生产为雨养农业。

为探讨不同播种时间对玉米需水量及绿水足迹的影响,在 2005—2007 年开展玉米大田试验。3 个试验年生长季降水量分别为 413.9 mm、235 mm、209.9 mm。2005 年生长季降水量高于多年平均值(387.3 mm),而 2006 年和 2007 年生长季遭遇干旱。以 1953—2009 年降水量为统计数据,2007 年的降水频率为 94%,生长季降水量不仅少,而且分布极不均匀,为极端干旱年。

2 研究方法

2.1 大田试验

在 2005—2007 年的大田试验中,玉米垄作垄台播种,垄距为 65cm,株距为 40cm。玉米品种为郑单 958。坐水种,用水量为 40 m³/hm²。种肥为磷酸二铵(N-P-K, 18-46-0),施肥量为 6.5g/株。大喇叭口期中耕施肥,尿素施用量为 6.5g/株。试验小区面积为 25 m×3.9 m,4 次重复,采用随机区组排列。每个试验小区的播种方法、施肥及其它管理方式均相同,生长季无灌溉。

2005 年的播种时间分别为 5 月 6 日、5 月 20 日、5 月 30 日、6 月 15 日;2006 年的播种时间分别为 5 月 7 日、5 月 15 日、5 月 30 日、6 月 15 日;2007 年的播种时间分别为 5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日、6 月 20

日。其中,每年的第1次播种时间为正常播种时间,作为对照。每年各播期均在10月1日收获。

2.2 水足迹量化方法

2.2.1 作物生长需水量

作物生长所需的水量采用联合国粮农组织 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算。

首先,计算气候因素影响下的参考作物需水 ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, R_n 为作物表面的净辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); U_2 为离地面 2m 高处的风速 (m/s); e_s 为饱和水气压 (kPa); e_a 为实测水气压 (kPa); $e_s - e_a$ 为饱和水气压与实际水气压的差额 (kPa); Δ 为饱和水气压与温度相关曲线的斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为湿度计常数 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

然后,用作物系数 K_c 对 ET_0 进行调整,获得具体农作物生长需水 ET_c :

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

本文采用联合国粮农组织开发的基于 Penman-Monteith 模型的 CropWat 软件计算玉米生长需水量。

2.2.2 作物生长需水中蓝水、绿水划分

作物生长需水一般包括蓝水和绿水两部分。蓝水是降水形成的地表水和地下水,是可见的液态水流,包括河流、湖泊及地下含水层中的水,在作物生长需水中通常以灌溉用水来表示;绿水是降水中下渗到非饱和土壤层中用于植物生长的水,是垂向进入大气的不可见水^[14-19]。

研究区玉米生长季无灌溉,除坐水种的需水量外,玉米生长需要的水分均来自土壤水。单位质量玉米生长所需水量的计算公式为:

$$VW_{\text{prod}} = VW_{\text{blue}} + VW_{\text{green}} = \frac{IR}{Y} + \frac{CWR - IR}{Y} \quad (3)$$

式中, VW_{prod} 为单位质量玉米生长需水量 (m^3/kg); VW_{blue} 为单位质量玉米蓝水量 (m^3/kg); VW_{green} 为单位质量玉米绿水量 (m^3/kg); CWR 为玉米生长需水量 (m^3/hm^2), $CWR = \frac{ET_c \times 10000}{1000}$; IR 为坐水种需水量 (m^3/hm^2); Y 为玉米产量 (kg/hm^2)。

玉米生长所需的绿水来源于两部分,一是有效降水,另一是除有效降水之外的土壤水。

当有效降水量 $ER \geq CWR - IR$ 时,单位质量玉米绿水量为:

$$VW_{\text{green}} = \frac{CWR - IR}{Y} \quad (4)$$

当有效降水量 $ER < CWR - IR$ 时,单位质量玉米绿水量由两部分组成,即:

$$VW_{\text{green}} = \frac{ER}{Y} + \frac{SW}{Y} \quad (5)$$

式中, ER 为有效降水量 (m^3/hm^2), SW 为除有效降水之外的土壤水消耗量 (m^3/hm^2)。

3 结果与分析

3.1 不同年份不同播种时间的玉米生长需水量

在3个试验年中,不同年份、不同播种时间的玉米产量不同,其中,2005年各播期的平均产量最高,2006年次之,2007年最低。每个试验年前3个播期的产量较高,而第四个播期的产量较低。

将2005—2007年研究区的气象数据输入联合国粮农组织提供的 Cropwat 8.0,并根据试验地的实际情况及区域的玉米系数^[20-22]对软件中的 K_c 值进行修正,计算玉米生长需水量。研究区不同播种时间玉米生长季各月需水量如图1所示。

相同播种时间的玉米生长需水量,2007年值最大,2006年次之,2005年最小。

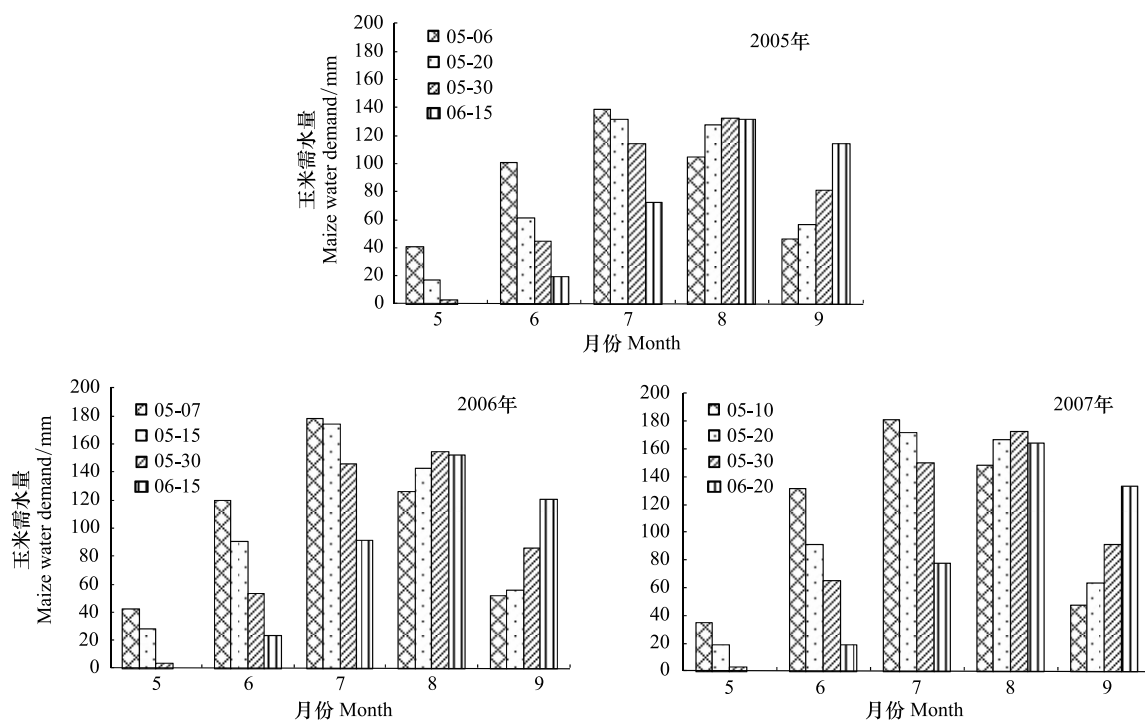


图1 2005—2007年不同播种时间玉米生长季各月需水量

Fig. 1 Water demand during maize growing season under different sowing dates in 2005, 2006 and 2007

在3个试验年中,正常播种时间的玉米生长季需水呈现先升后降的趋势,高峰期均在6—8月。玉米生长初期,植株较小,需水量低;6月以后随着植株增大,叶面积指数增大,蒸腾量增加,需水量升高;到7、8月份玉米冠层充分发育,需水量大,7月达到最大值。9月,由于植株衰老,蒸腾量减少,需水量亦降低。

第2个播期的玉米生长季需水量与正常播种时间需水量规律一致,只是由于播种时间推后,5月需水量较少,而8、9月需水量与正常播种时间相比明显增加,增加幅度达10%—30%。总需水量低于正常播种时间。

第3个播期,6月需水量与正常播种时间相比较小,8月需水量最大,9月需水量大幅增加,增加幅度达70%—90%。总需水量低于前一播期。

第4个播期的玉米生长季需水量,8、9月为需水高峰期,但由于播种时间延后,生长尚未完成,总需水量最低。

3.2 不同年份不同播种时间的玉米绿水足迹

研究区玉米生长所需水分来源,除坐水种的蓝水外,无灌溉,其它均来源于绿水,如表1。蓝水消耗量占需水量的0.7%—1.1%,绿水消耗量占98.9%—99.3%。

3a中,虽然采用相同的试验地、相同的品种、相同的播种方法、相同的施肥量、相同的农田管理,但由于不同播种时间的水热条件的差异,玉米产量差异明显,因此,单位质量玉米蓝水、绿水的消耗量也不同,如表2。

3a中,单位质量玉米蓝水量约0.005—0.019 m³/kg,占单位质量玉米需水量的1%左右;单位质量玉米绿水量为0.467—1.608 m³/kg,占单位质量玉米需水量的99%左右。其中,前3个播期2007年单位质量玉米绿水量最高,2005年最低;而最后一个播期2007年的单位质量玉米绿水量最低,2005年最高。

研究区降水量较少,有效降水量无法满足玉米生长需水,因此,除有效降水之外,还需由原来储存在土壤中的水分来满足玉米生长需要。因此,玉米生长消耗的绿水由两部分组成,即有效降水和土壤水。有效降水与土壤水在生长季各月的水足迹比较如表3。

表 1 2005—2007 年不同播种时间玉米生长需水中的蓝水、绿水足迹 (m^3/hm^2)

Table 1 Blue water footprint and green water footprint of maize under different sowing dates in 2005, 2006 and 2007

年份 Time	播种时间 Sowing date	玉米需水量 Water demand of maize	蓝水足迹 Blue water footprint	绿水足迹 Green water footprint
2005	05-06	4318	40	4278
	05-20	3938	40	3898
	05-30	3750	40	3710
	06-15	3378	40	3338
2006	05-07	5180	40	5140
	05-15	4905	40	4865
	05-30	4426	40	4386
	06-15	3871	40	3831
2007	05-10	5438	40	5398
	05-20	5126	40	5086
	05-30	4821	40	4781
	06-20	3941	40	3901

表 2 2005—2007 年不同播种时间单位质量玉米蓝水、绿水量 (m^3/kg)

Table 2 Blue water volume and green water volume per unit maize weight under different sowing dates in 2005, 2006 and 2007

年份 Time	播种时间 Sowing date	单位质量玉米蓝水量 Blue water volume per unit maize weight	单位质量玉米蓝水量 占单位质量玉米 需水量的比例 Proportion of blue water volume	单位质量玉米绿水量 Green water volume per unit maize weight	单位质量玉米绿水量 占单位质量玉米 需水量的比例 Proportion of green water volume
2005	05-06	0.005	0.9%	0.568	99.1%
	05-20	0.005	1.1%	0.467	98.9%
	05-30	0.005	1.0%	0.473	99.0%
	06-15	0.019	1.2%	1.608	98.8%
2006	05-07	0.005	0.8%	0.634	99.2%
	05-15	0.005	0.8%	0.617	99.2%
	05-30	0.006	0.9%	0.691	99.1%
	06-15	0.014	1.0%	1.365	99.0%
2007	05-10	0.006	0.7%	0.815	99.3%
	05-20	0.007	0.8%	0.912	99.2%
	05-30	0.006	0.8%	0.749	99.2%
	06-20	0.014	1.1%	1.317	98.9%

表 3 2005—2007 年不同播种时间玉米绿水足迹分解 (m^3/hm^2)

Table 3 Green water footprint of maize under different sowing dates in 2005, 2006 and 2007

年份 Time	播种时间 Sowing date	5 月 May		6 月 June		7 月 July		8 月 August		9 月 September	
		有效降水 足迹	土壤水 足迹	有效降水 足迹	土壤水 足迹	有效降水 足迹	土壤水 足迹	有效降水 足迹	土壤水 足迹	有效降水 足迹	土壤水 足迹
2005	05-06	156	210	1009	0	786	602	784	266	465	0
	05-20	129	3	616	0	786	527	784	490	563	0
	05-30	0	0	435	0	786	360	784	537	617	191
	06-15	—	—	151	0	725	0	784	533	617	528
2006	05-07	101	282	497	700	600	1182	600	662	325	191
	05-15	84	153	497	406	600	1144	600	827	325	229
	05-30	0	0	497	29	600	860	600	942	325	533
	06-15	—	—	192	0	600	310	600	925	325	879
2007	05-10	114	195	354	964	882	932	305	1178	191	283
	05-20	72	81	354	557	882	837	305	1364	191	443
	05-30	0	0	354	287	882	617	305	1425	191	720
	06-20	—	—	152	0	775	0	305	1341	191	1137

有效降水足迹 Effective precipitation footprint; 土壤水足迹 Soil water footprint

玉米生产的绿水足迹中,降水较充足的 2005 年以有效降水足迹为主,而降水少的干旱年份 2006 年、2007 年以土壤水足迹为主。

2005 年正常播种时间的绿水足迹中,6 月结余有效降水量 $88\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 7 月土壤水消耗,9 月结余有效降水量 $152\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。土壤水共支出 $838\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 2 个播期的绿水足迹中,6 月结余有效降水量 $481\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 7 月土壤水消耗,9 月结余有效降水量 $54\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。土壤水共支出 $485\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 3 个播期的绿水足迹中,5 月结余蓝水 $11\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、有效降水量 $13\text{ m}^3/\text{hm}^2$,6 月结余有效降水量 $662\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 7、8 月土壤水消耗。土壤水共支出 $403\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。第 4 个播期的绿水足迹中,6 月结余有效降水量 $474\text{ m}^3/\text{hm}^2$,7 月结余有效降水量 $61\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 8、9 月土壤水消耗。土壤水共支出 $526\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

2006 年正常播种时间的绿水足迹中,每月有效降水量均无结余,土壤水共支出 $3017\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 2 个播期的绿水足迹中,每月有效降水量均无结余,土壤水共支出 $2759\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 3 个播期的绿水足迹中,5 月结余蓝水 $8\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、有效降水量 $23\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 6 月土壤水消耗。土壤水共支出 $2341\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 4 个播期的绿水足迹中,6 月结余有效降水量 $101\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 7 月土壤水消耗。土壤水共支出 $2013\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

2007 年正常播种时间的绿水足迹中,每月有效降水量均无结余,土壤水共支出 $3552\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 2 个播期的绿水足迹中,每月有效降水量均无结余,土壤水共支出 $3282\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 3 个播期的绿水足迹中,5 月结余蓝水 $8\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、有效降水量 $12\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 6 月土壤水消耗。土壤水共支出 $3037\text{ m}^3/\text{hm}^2$;第 4 个播期的绿水足迹中,6 月结余有效降水量 $25\text{ m}^3/\text{hm}^2$,7 月结余有效降水量 $107\text{ m}^3/\text{hm}^2$,补给 8 月土壤水消耗。土壤水共支出 $2346\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

3.3 气象因素对不同播种时间的玉米绿水足迹的影响

3a 大田试验中,不同播种时间的绿水足迹均是从前往后依次递减,相同播种时间的玉米绿水足迹 2005 年最低,2007 年最高,2006 年居中。玉米绿水足迹的变化不仅受播种日期的影响,而且与气候条件密切相关。玉米生长季各旬气温、降水与物候期如图 2。

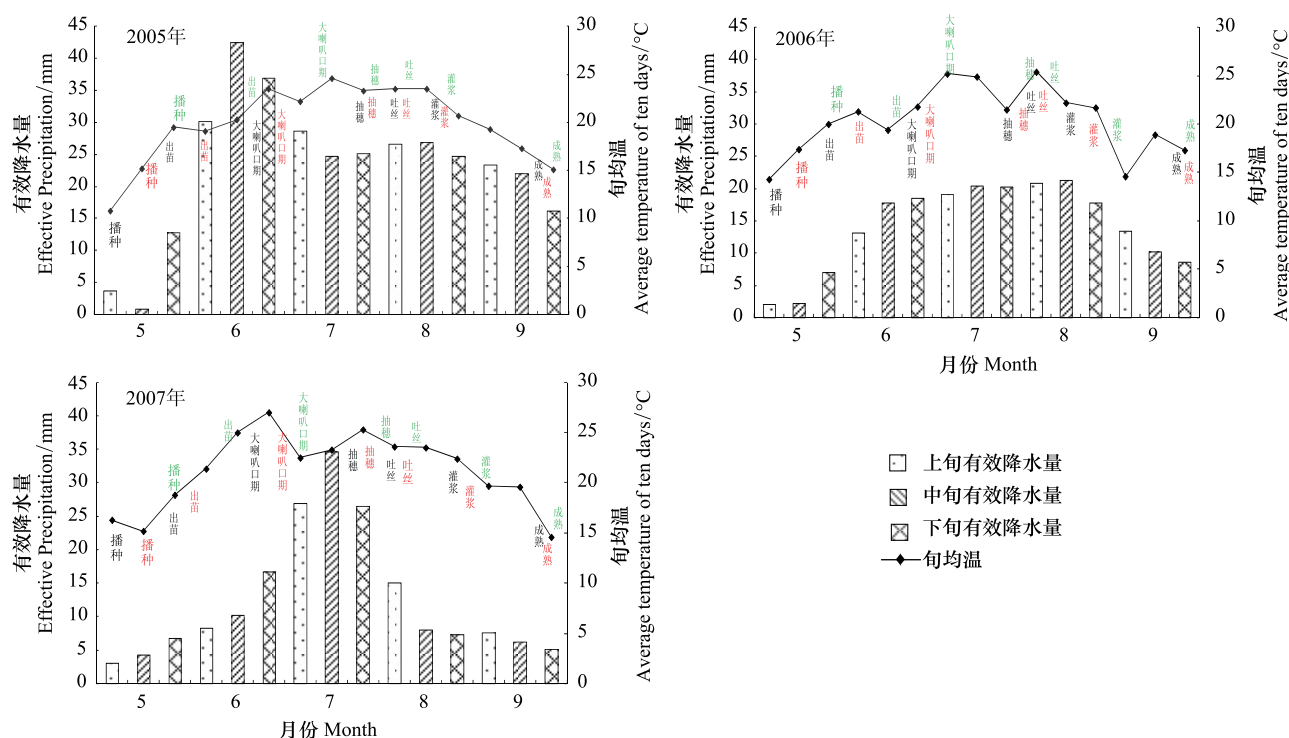


图 2 2005—2007 年不同播种时间玉米生长季旬气温、旬降水与物候期

Fig. 2 Comparison of dekad temperature and precipitation with phenophase during maize growing season in 2005, 2006 and 2007

降水量较充足的 2005 年,5、6 月降水多,正常播种时气温较低,出苗时间较第 2 个播期和第 3 个播期长,前 3 个播期基本同时进入抽穗期。第 2 个播期和第 3 个播期玉米生长的雨热条件优于正常播期,而第 2 个播期比第三个播期的生育期略长一些,产量高。2005 年前 3 个播期的绿水足迹中有效降水量分别占 80.4%、87.6% 和 89.1%。

降水分布正常的一般干旱年 2006 年,受高温少雨的影响,前 3 个播期出苗所用时间基本相同,所以先播种的玉米各生育期都早,百粒重和单穗的粒数显著高于后播种的,因此早播种产量较高。2006 年前 3 个播期的绿水足迹中有效降水量分别占 41.3%、43.3% 和 46.6%。

降水分布极不均匀的极端干旱年 2007 年,5 月和 6 月降水较少,直到 7 月才有较多降水,各播期玉米产量均较低。正常播种时间的玉米比第 2 个播期、第 3 个播期出苗快,百粒重较大。第 3 个播期比第 2 个播期更靠近雨期,所以第 3 个播期玉米的百粒重和单穗的粒数都优于第 2 个播期。2007 年前 3 个播期的绿水足迹中有效降水量分别占 34.2%、35.5% 和 36.5%。

2005—2007 年的大田试验说明,在前 3 个播期中,越晚播有效降水量所占比重越大,对土壤水平衡有利;而越是干旱的年份,有效降水量在绿水足迹中所占的比重越小,对土壤含水量影响越大,不利于土壤水平衡。从不同播期的绿水足迹来看,正常播种时间 5 月土壤水消耗量较大,远远超过有效降水量,第 2、第 3 个播期的玉米生长季中降水量较大,气温亦较高,雨热匹配优于正常播种时间,利于玉米生长,而且有效降水量所占比重也较大。因此,可选择适当延后播种,提高雨水的利用率。

4 结论与讨论

(1) 探讨不同播种时间对玉米绿水足迹的影响,既可掌握不同年份玉米绿水足迹的变化,分析玉米生产过程中的水分来源,又可了解播种时间与玉米生长季雨热的最佳匹配,确定降水资源对作物生产的满足程度,为解决生产中存在的矛盾提供一定的依据。只有充分利用当地降水资源,才利于保护土壤水平衡,促进农业的可持续发展。

(2) 研究区玉米传统播种时间在 5 月 1 日前后,正值气温高、降水少、多大风的时段,对出苗和幼苗定居极为不利,甚至由于大风使种子被吹出,不得不补种或者重种,贻误农时并加重农民的经济负担。如果延迟播种可躲过大风期,又能有效降水出现,将有利于出苗。本文通过大田试验,认为晚播有利于提高有效降水的利用量,保护土壤水平衡。可将玉米播种期适当延后,提高雨养农业区雨水的利用率。

(3) 在目前的虚拟水、水足迹研究中,基本上是运用统计数据来加以计算分析,但是统计数据中的粮食产量、灌溉量等只是某地区的总值,不能反映这一地区内的差异及某一地块的实际产量、用水量等。通过大田试验,从微观的角度探讨水足迹,既可突破虚拟水、水足迹只从宏观、中观进行研究的局限,又可反映实际的生产状况。本文探讨了相同的土壤及农田管理条件下,不同试验年份玉米绿水足迹的变化规律,为绿水进一步细分,提高绿水利用率提供依据。在有条件的情况下,应延长大田试验研究时间,获得较长时间序列数据,以充分反映水足迹变化规律。

References:

- [1] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible // ODA, Priorities for Water Resources Allocation and Management. ODA, London, 1993: 13-26.
- [2] Hoekstra A Y. Virtual water: an introduction. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade-value of Water Research Report Series No. 12. Delft, Netherlands: IHE, 2003.
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics, 2006, 60:186-203.
- [4] Xu Z M, Long A H, Zhang Z Q. Virtual water consumption calculation and analysis of Gansu province in 2000. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 861-869.
- [5] Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Estimate and analysis of water footprint in Northwest China, 2000. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6):692-700.

- [6] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 2007, 64: 109-118.
- [7] Xu Z M, Long A H. The primary study on assessing social water scarcity in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 982-988.
- [8] Zhou J, Shi A N. Method for calculating virtual water trade and demonstration. *China Population, Resources and Environment*. 2008, 18(4): 184-188.
- [9] Wang X H, Xu Z M, Li Y H. A rough estimate of water footprint of Gansu Province in 2003. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 909-915.
- [10] Zhao X, Yang Z F, Chen B. Study on Chinese virtual water trade and consumption in an input-output framework. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 286-294.
- [11] Zou J, Yang Y R, Huang C Q, Mao D H. Concept and quantitative assessment of advantage value of regional virtual water strategy (AVRVWS). *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(1): 78-82.
- [12] Huang J, Song Z W, CHEN F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6546-6554.
- [13] Sun C Z, Liu Y Y, Chen L X, Zhang L. The spatial temporal disparities of water footprints intensity based on gini coefficient and their index in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [14] Falkenmark M. Land-water linkages: A synopsis // *Land and Water Integration and River Basin Management: Proceedings of an FAO informal workshop*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995(1): 15-16.
- [15] Ringersma J, Batjes N H, Dent D L. Green water: Definitions and data for assessment. Wageningen: ISRIC-World Soil Information, 2003.
- [16] Falkenmark M, Rockstrom J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(3): 129-132.
- [17] Cheng G D, Zhao W Z. Green water and its research progresses. *Advances in Earth Science*. 2006, 21(3): 221-227.
- [18] Liu C M, Li Y C. Green water and water Saving: discussion on connotation of Chinese water resources. *Impact of Science on Society*. 2006(1): 16-20.
- [19] He H, Huang J, Huai H J, Tong W J. The water footprint and its temporal change characteristics of rice in Hunan. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2010, 26(14): 294-298.
- [20] Wang D N, Ma Y P, Wang S L, Guo C M. Sensitivity analysis on the soil water parameters in maize growth model in Northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 219-224.
- [21] Liu Z M, Yan M, Shen B Z. Moisture profit and loss and yield potential of maize in central and western regions of Jilin Province. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 1998, 14(4): 269-272.
- [22] Kang Z J, Yin G H, Liu Z X, Zhang F S, Shen Y J, Tong N, Gu J. Water requirement regulation and irrigation forecast of corn in western Liaoning. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(5): 614-620.

参考文献:

- [4] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用. *地理学报*, 2003, 58(6): 861-869.
- [5] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700.
- [7] 徐中民, 龙爱华. 中国社会化水资源稀缺评价. *地理学报*, 2004, 59(6): 982-988.
- [8] 周姣, 史安娜. 区域虚拟水贸易计算方法及实证. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(4): 184-188.
- [9] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省2003年的水足迹评价. *自然资源学报*, 2005, 20(6): 909-915.
- [10] 赵旭, 杨志峰, 陈彬. 基于投入产出分析技术的中国虚拟水贸易及消费研究. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 286-294.
- [11] 邹君, 杨玉蓉, 黄翅勤, 毛德华. 中国区域虚拟水战略优势度评价. *地理科学*, 2009, 29(1): 78-82.
- [12] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6546-6554.
- [13] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [17] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 221-227.
- [18] 刘昌明, 李云成. “绿水”与节水: 中国水资源内涵问题讨论. *科学对社会的影响*, 2006(1): 16-20.
- [19] 何浩, 黄晶, 淮贺举, 童文杰. 湖南省水稻水足迹计算及其变化特征分析. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 294-298.
- [20] 王冬妮, 马玉平, 王石立, 郭春明. 东北玉米生长模型中土壤水分参数的敏感性分析. *中国农业气象*, 2010, 31(2): 219-224.
- [21] 刘志明, 晏明, 沈柏竹. 吉林省中西部地区玉米水分盈亏计算与增产潜力的分析研究. *农业系统科学与综合研究*, 1998, 14(4): 269-272.
- [22] 亢振军, 尹光华, 刘作新, 张法升, 沈业杰, 佟娜, 谷健. 辽西玉米需水规律及灌溉预报研究. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(5): 614-620.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria italica</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元